

РАЗВИТИЕ МЕТОДА СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА НА ПРИМЕРЕ ОНОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА САХАЛИНЕ ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 г.)

А.С. Закупин, Ю.Н. Левин*, Н.В. Богинская, О.А. Жердева

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

** Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН, 693010, Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2А, Россия*

Изучены возможности метода среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR (load-unload response ratio) на примере о. Сахалин. Рассматривается подход к формированию прогнозных условий и оценке их выполнения в реальном времени. Для обобщения были привлечены данные ретроспективного анализа других крупных Сахалинских землетрясений. Показано, что отклонения параметров прогноза от заданных значений удовлетворительны для данного метода. Рекомендуется использовать данный метод для составления сводок среднесрочных прогнозов по Сахалину, при этом необходимо обеспечить максимальную оперативность наполнения каталогов.

Прогноз, сейсмичность, каталог, LURR.

DEVELOPMENT OF MEDIUM-TERM PREDICTION METHODS: A CASE STUDY OF THE AUGUST 14, 2016 ONOR ($M_w = 5.8$) EARTHQUAKE ON SAKHALIN

A.S. Zakupin, Yu.N. Levin, N.V. Boginskaya, and O.A. Zherdeva

The potential of the load-unload response ratio (LURR) method for medium-term earthquake prediction is studied for Sakhalin Island as an example. An approach to the generation of predicted conditions and assessment of their implementation in real time is considered. The results of a retrospective analysis of other large Sakhalin earthquakes are used for generalization. It is shown that deviations of prediction parameters from specified values are satisfactory for this method. It is recommended that this method be used to compile summaries of medium-term predictions for Sakhalin provided that catalogs should be filled as soon as possible.

Prediction, seismicity, catalog, LURR

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая обстановка на Дальнем Востоке, в том числе и в Сахалинской области, в последние годы характеризуется значительной активизацией, включая в том числе и районы добычи углеводородов. Особенно тяжелыми были последствия двух землетрясений на о. Сахалин: Нефтегорского 1995 г. ($M_w = 7.2$) и Невельского 2007 г. ($M_w = 6.2$). Это диктует необходимость развития исследований по выявлению закономерностей подготовки сильных событий и использованию их в средне- и краткосрочных экспериментальных прогнозах. К настоящему времени достигнуты определенные успехи в плане долго- и среднесрочного прогнозирования сильных землетрясений. В первую очередь следует отметить прошедшие длительную апробацию методы российских сейсмологов, в частности С.А. Федотова [Федотов, 1965, 1968, 2005], В.И. Кейлис-Борока и В.Г. Кособокова [Кособоков и др., 1990; Keilis-Borok, Rotwain, 1990], Г.А. Соболева [Соболев, 1993], А.Д. Завьялова [Завьялов, 2006]. Эти подходы базируются на сейсмологических данных, а прогнозы составляются, как правило, на периоды 5—10 лет (долгосрочный) и 3—5 лет (среднесрочный).

В данной работе используется подход для среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR (load/unload response ratio) [Yin et al., 1995, 2001], который ранее в российской практике не использовался. Этот подход позволяет идентифицировать опасность реализации сильного сейсмического события в локальной области (до 300 км) и охватывает период от нескольких месяцев до двух лет. Методика LURR появилась в 90-х годах прошлого столетия [Yin et al., 1995] и, по данным работ [Yin et al., 1995, 2001], была с некоторым успехом применена для нескольких сейсмически активных районов нашей планеты. Обоснованность теоретической базы авторы метода проверяли в серии лабораторных экспериментов на образцах горных пород [Elizarov, Li, 2004]. Основным ограничением для широкого применения данного метода были характерные для прогнозных методик моменты: низкий уровень воспроизво-

димости результата и отсутствие оперативных реализаций. На сегодняшний день эти вопросы не решены, хотя авторы продолжают работу над методикой, в том числе в области автоматизации и повышения сложности компьютерных расчетов [Feng et al., 2012]. Однако теоретическая база, на которую опирается методика (непротиворечивые соотношения теории упругости и механики разрушения), а также возможность для настройки алгоритма создают потенциал для развития. В ИМГиГ ДВО РАН эту методику используют с 2014 г. Для работы с LURR в ИМГиГ был разработан специализированный программный комплекс Seis-ASZ [Закупин, 2016а,б]. Анализ сейсмичности Сахалина проводился по данным трех каталогов. Расчетные зоны представляли собой эллипсы с осями в меридиональном и широтном направлениях в 1 градус. Первый каталог сейсмической сети ИМГиГ ДВО РАН [Stepnov et al., 2014], которая функционирует на Сахалине с 2006 г. и охватывает северную его часть (от 50 до 54° с.ш.). Второй [Каталог..., 2011] охватывает южную часть в период с 2000 по 2010 г., затем расширены до 2015 г. по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН. Третий каталог Л.Н. Поплавской включает всю территорию Сахалина [Поплавская и др., 2006] для анализа землетрясений с 1906 по 2005 г. Использование различных каталогов оправдано тем, что удастся охватить максимальное количество сильных землетрясений на Сахалине, отправной точкой стал 1988 г. для анализа Нефтегорского землетрясения. Анализ показал, что таких землетрясений до 2015 г. на Сахалине произошло пять (Невельское, Горнозаводское, Уангское, Пильтунское и Нефтегорское), из которых два первых были на юге, а остальные — на севере. Графики LURR демонстрируют пять вариаций (рис. 1), одна из которых относится к прогнозу события, выходящего за границы рассматриваемого периода (см. рис. 1, *г*). Четыре других вариации по времени совпадают с четырьмя землетрясениями из списка, за исключением Горнозаводского (см. рис. 1, *а*, *в*, *г*). Фактически реализация прогноза по времени и силе (выше 5.5) 4 из 5, в пространстве точность положения расчетной области размером 2×2 градуса в пределах 0.5—1.0 градуса. Есть причины, которыми можно объяснить отсутствие данных по пятому землетрясению. Ретроспективный анализ данных по

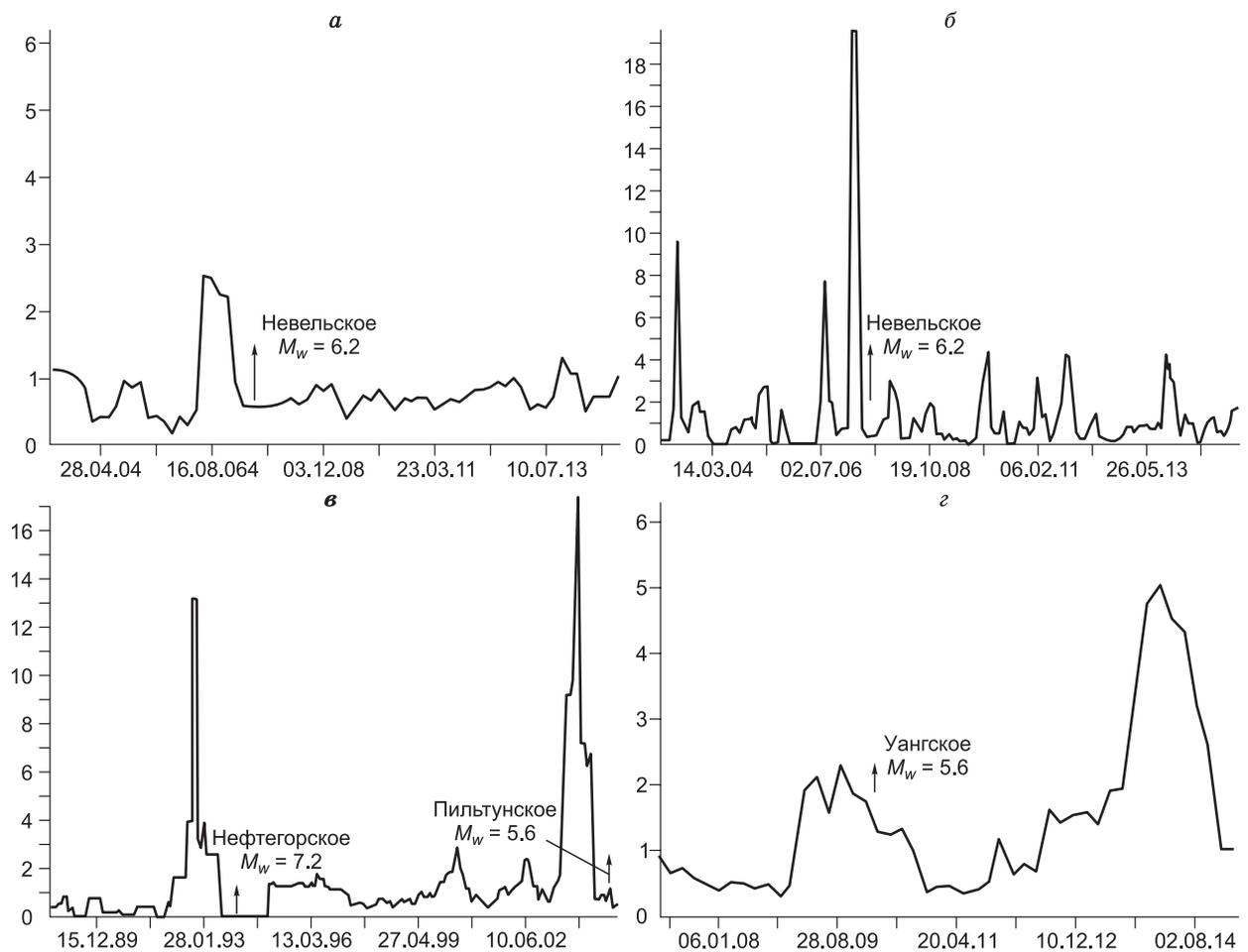


Рис. 1. Функция LURR, параметры расчета:

а — окно 360 дней, сдвиг 30 дней; *б* — окно 90 дней, сдвиг 10 дней; *в* — окно 360 дней, сдвиг 30 дней; *г* — окно 360 дней, сдвиг 30 дней.

Параметры ретроспективных прогнозов

Параметр	Землетрясение			
	Невельское	Пильгунское	Уангское	Нефтегорское
Ожидаемое значение				
Магнитуда, M_w	>5.5	>5.5	>5.5	>5.5
Положение ($\pm 1^\circ$)	142° в.д. 47° с.ш.	143° в.д. 52.5° с.ш.	142° в.д. 52° с.ш.	143° в.д. 52.5° с.ш.
Время с момента обнаружения предвестника	до 2 лет	до 2 лет	до 2 лет	до 2 лет
Наблюденное значение				
Магнитуда, M_w	6.2	5.6	5.6	7.0
Положение	141.7° в.д. 46.8° с.ш.	143.7° в.д. 52.7° с.ш.	142.2° в.д. 52.1° с.ш.	142.7° в.д. 52.5° с.ш.
Время с момента обнаружения предвестника	12 мес.	6 мес.	4 мес.	18 мес.

вариациям LIURR перед Невельским землетрясением проведен в работах [Закупин, 2016а; Тихонов, Закупин, 2016]. Горнозаводское (17.08.2006 г., $M = 5.6$) землетрясение произошло ровно за год до Невельского землетрясения, причем в том же районе. Ширина окна в математической обработке соответствовала временному разному между двумя землетрясениями, поэтому визуально создается впечатление о влиянии первого землетрясения на формирование предвестника второго. Дополнительная математическая обработка (с меньшими параметрами окна осреднения) позволила разделить два процесса (см. рис. 1, б). Очевидно, что уменьшение окна обработки при недостаточной плотности событий в расчетной зоне ведет к появлению ложных тревог, а потому может использоваться как вспомогательный инструмент.

Результаты по северу Сахалина описаны в работе [Закупин, Жердева, 2017]. Были определены четыре признака, причем три из них соответствовали известным землетрясениям (Нефтегорское [28.05.1995 г., $M = 7.2$], Пильгунское [12.06.2005, $M = 5.6$] и Уангское [16.03.2010, $M = 5.7$] землетрясения), а один определил режим тревоги на текущий период [Закупин, Жердев, 2017]. Результаты моделирования приведены на рис. 1, в, г. В таблице даны ожидаемые значения параметров по четырем оправдавшимся прогнозам (данные ретроспективного анализа сейсмичности Сахалина с 1988 по 2015 г.) и фактические (наблюденные) значения.

В таблице хорошо прослеживается несколько выводов. Помимо главного вывода об удовлетворительной сходимости параметров, можно отметить, что амплитуда аномалии LURR (прогнозного признака) зависит от математической обработки и, вероятно, не связана с энергией будущего землетрясения. Напротив, время возникновения «скачка» практически не зависит от обработки, а следовательно, очень интересным выглядит корреляция между временем подготовки события и его энергией.

В 2016 г. произошло землетрясение, которое по характеристикам может соответствовать вариации 2014 г. (см. рис. 1, г). Авторы статьи ожидали данное событие, но прогноз не был заявлен в установленном порядке. В настоящей работе представлены материалы по истории данного прогноза и фактической реализации Онорского землетрясения 14 августа 2016 г.

МЕТОДИКА

Название метода можно перевести с английского как «отношение отклика среды на нагрузку/разгрузку». Метод опирается на непротиворечивые модели теории упругости (модель абсолютно жесткой Земли) и механики разрушения (критерий Кулона—Мора). Основной посыл состоит в том, что за пределами упругого деформирования среды реакция на нагрузку не соответствует реакции на разгрузку. Со временем это несоответствие только усиливается вплоть до потери устойчивости разрушающегося объекта. Метод предполагает решение уравнений теории упругости для определения компонент тензора напряжений на площадке, где расположен слип-вектор. Расчеты выполняются для каждого землетрясения в каталоге. Для определения положения фокальной плоскости с помощью программы FOCMEC, интегрированной в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottmöller et al., 2011] определялись механизмы землетрясений. Часть решений удавалось получить, в противном случае проблему решали подбирая решения исходя из карты ВОЗ и механизмов очагов сильных землетрясений для основных линейментов и доменов. Например, для Онорского землетрясения в расчетную зону попали 517 землетрясений с 2006 по январь 2016 г. В рабочий диапазон магнитуд 3.3—5.0 попадает 48 событий, среди которых механизмы с высокой точностью рассчитаны для 20 (по данным не менее 12 станций), остальные рассчитаны с меньшей точностью, около 10 подобраны. Улучшить здесь ситуацию можно лишь уплотнением сети сейсмических станций.

При этом учитываются смещения от приливного воздействия в заданной точке. Использование в методе лунно-солнечных приливов оправдано тем, что другого такого идеально откалиброванного индикатора нагрузки/разгрузки в геосреде найти невозможно. Тектоническая и литостатическая компоненты не учитываются, так как скорости их изменения на порядки отличаются от приливных. Для разделения землетрясений на «нагрузочные» и «разгрузочные» проводится расчет критерия Кулона—Мора. Если землетрясение произошло во время роста значения этого критерия, то оно определяется как «положительное», в противном случае как «отрицательное». Исследуемый параметр (LURR) отождествляется с отношением суммарной деформации Беньоффа всех положительных землетрясений ко всем отрицательным за некоторый промежуток времени (в математической обработке это величина скользящего окна). В упругоэластических средах перед разрушением наблюдается явление текучести, когда при неизменных напряжениях деформация продолжает расти. Очевидно, что при таком положении вещей расчет отношения отклика на нагрузку к отклику на разгрузку не имеет смысла (реакции как таковой нет), а математически параметр LURR снова становится близким к единице. В области перехода от упругого к неупругому деформированию этот параметр начнет расти и вблизи разрушения среды достигнет своих максимальных значений. Именно поэтому в среде, где реализуется хрупкое разрушение, можно ожидать главное (прогнозируемое) событие после выхода кривой на максимальные значения, а в среде, где возможно проявление пластических эффектов, возникает возврат параметра к фоновому уровню и некоторая задержка (временной лаг с момента определения прогнозного признака, вариации LURR) по времени. Очевидно, что эта задержка зависит от геологических условий. Метод LURR очень подробно излагается в оригинальных работах [Yin et al., 1995], поэтому ограничимся лишь отдельными вопросами выбора параметров для моделирования.

Важным компонентом, который определяет итоговый результат, является выборка сейсмических событий. В методике LURR для прогноза землетрясения авторы [Yin et al., 1995] используют сепарацию сигналов, основанную на выделении полосы магнитуд для расчета. Основа для выбора диапазона — это величина разрыва в очаге. Ретроспективно это работает, на практике для оперативного прогноза можно использовать карты районирования и графики повторяемости для оценки величины возможного события. На этой же основе выбирается и область для расчета, по которой из каталога делается выборка. Таким образом, учитываются только события определенной магнитуды и эпицентрального расположения. Например, для магнитуд порядка 6 и выше область расчета не должна быть меньше 2° по широте и долготе. Считаем это обоснованным, так как исследования по сейсмическому районированию и прогнозу землетрясений показали, что пространственно-временные и сейсмогеодинамические признаки подготовки крупных сейсмических событий следует рассматривать как систему, охватывающую разномасштабные иерархические уровни сейсмической активизации — глобальный, региональный, локальный и очаговый [Уломов и др., 1993]. Чем крупнее сейсмические очаги и, соответственно, чем выше магнитуда генерируемых ими землетрясений, тем крупнее и объемы геологической среды, ответственные за их подготовку. Поэтому при изучении очаговой сейсмичности, сейсмического режима, при оценке сейсмической опасности той или иной территории всегда необходимо исходить из соответствующих размеров конкретных и генетически взаимосвязанных сейсмогенерирующих геологических структур сейсмоактивных регионов. Для наиболее крупных сейсмических очагов протяженность таких геоструктур может достигать нескольких тысяч, а ширина — нескольких сот километров [Уломов и др., 1993]. Для нашей работы мы полагаем, что размер рабочей области, в пределах которой может быть расположен очаг землетрясения конкретной магнитуды, должен превышать, как минимум, в четыре раза размеры такого очага. Параметры математического блока хорошо отработаны в наших исследованиях по ретроспективному анализу на Сахалине, а потому преимущество сохраняется.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе [Закупин, 2016б] был продемонстрирован результат (см. рис. 1, з) анализа данных с 2006 по 2015 г., который свидетельствовал об «опасности в северной части Сахалина, которая будет сохраняться до октября—ноября 2016 года» [Закупин, 2016б, с. 42]. Магнитуда прогнозируемого события оценивалась в рамках модели LURR и должна была быть больше 5.5. Вероятность с учетом успешных ретроспективных оценок методом LURR для Сахалина была очень высокой. Однако на тот момент формулировка на «Севере» Сахалина (от 51 до 55° с.ш.) оставалась слабым звеном для локализации очага будущего события. Для уточнения прогноза в пространственной области был проведен анализ нескольких расчетных зон. На рис. 2 показано расположение зон. Уточнение места будущего землетрясения с помощью такого разбиения на зоны (см. рис. 2) указало на то, что вероятность больше в части Сахалина между 51 и 53° с.ш. По уточненным данным на заседании Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (протокол № 3 от 16.03.2016) автором (Закупин А.С.) был сделан доклад. На нем сообщалось, что до конца 2016 г. на

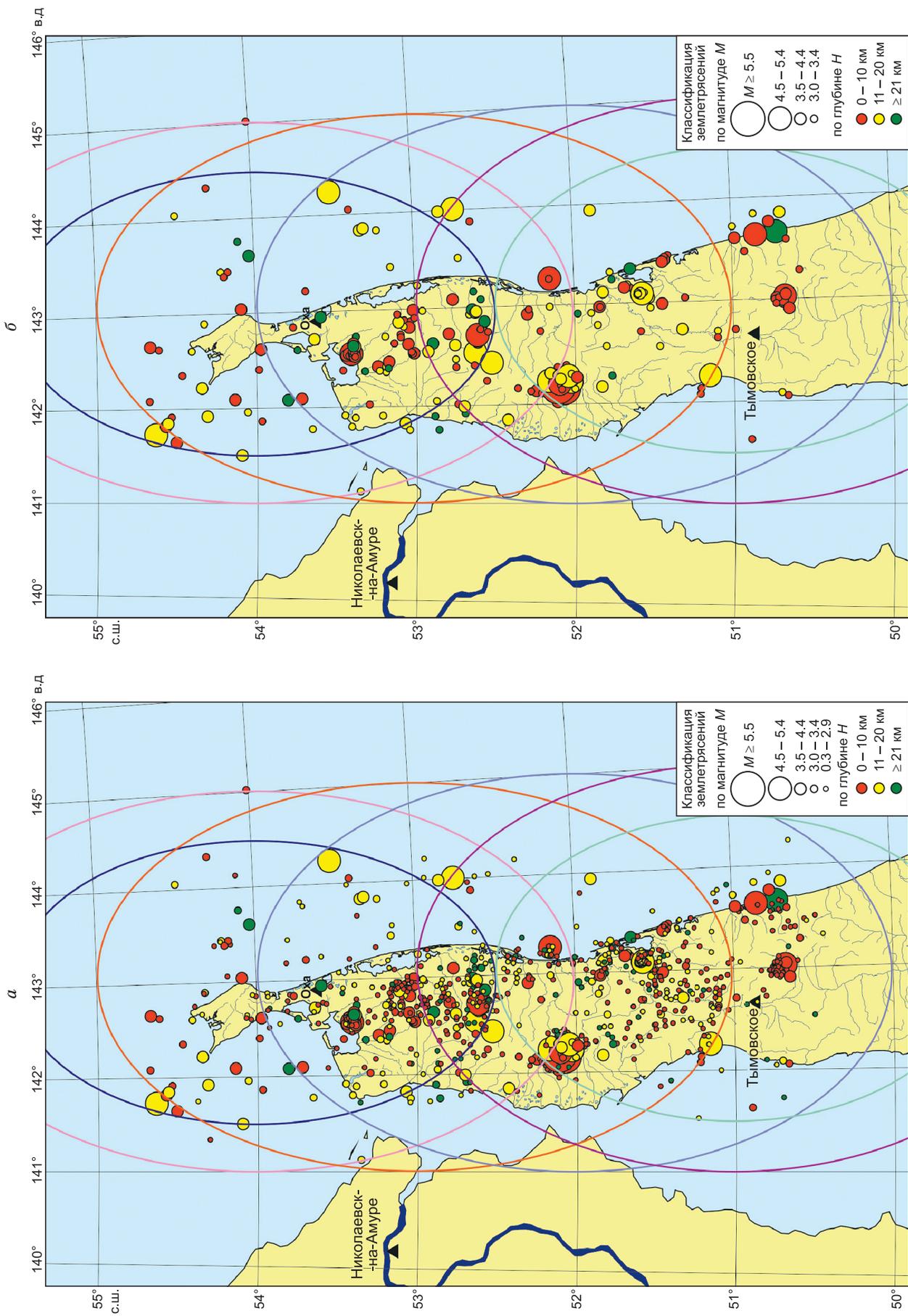


Рис. 2. Карта сейсмических событий Северного Сахалина с 2006 по 2016 г.

а — полная (все землетрясения); б — в диапазоне магнитуд от 3.3 до 5.

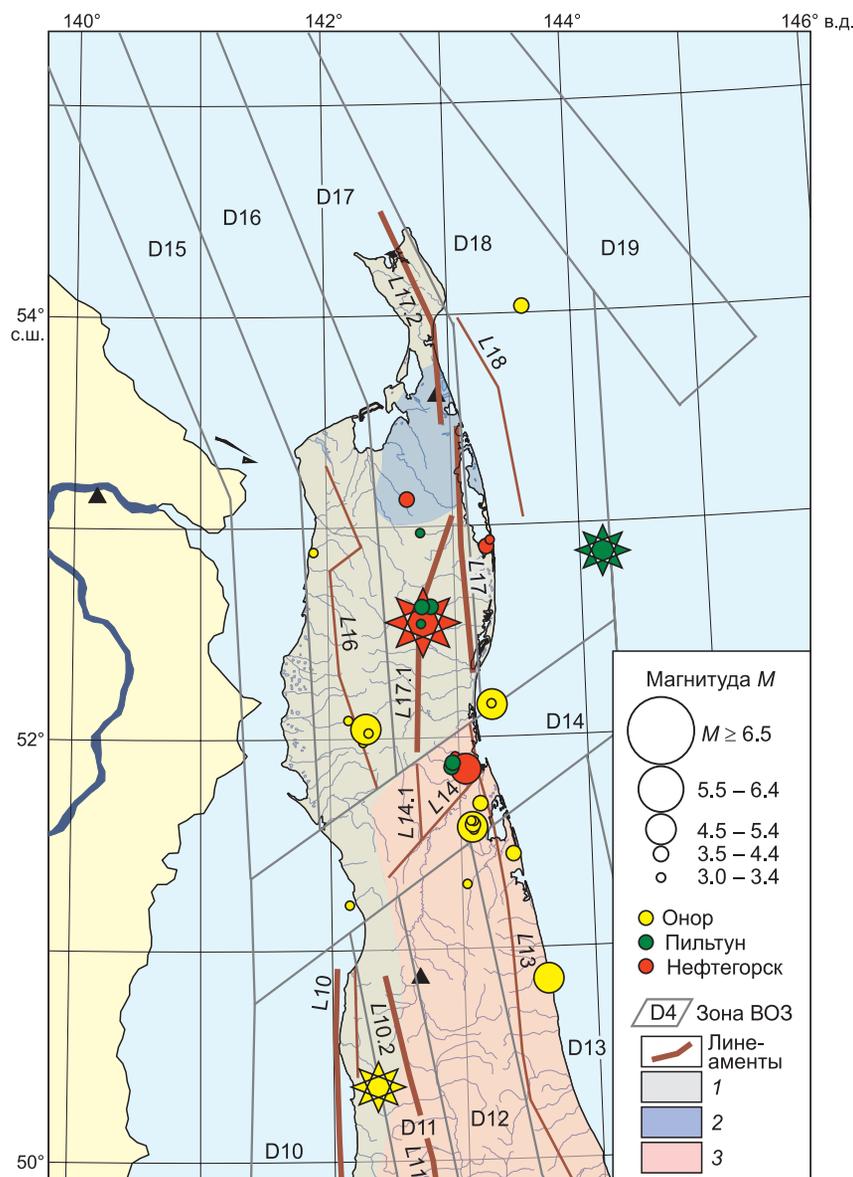


Рис. 3. Эпицентры Онорского, Пильтунского и Нефтегорского (звезда) и признаки главных событий землетрясений (сферы), совмещенные с картой зон ВОЗ модели ИМГиГ 2007 [Левин и др., 2012].

о. Сахалин в северной его части между 52 и 53° с.ш. ожидается землетрясение магнитудой выше 5.5. По представленному докладу было принято решение уделить повышенное внимание к развитию сейсмического процесса на широтах 52—53°. В июне 2016 года разработчиком программного комплекса Seis-ASZ [Закупин, 2016а,б] для анализа LURR предложен дополнительный инструмент для уточнения прогноза в пространственной области на имеющемся функционале. Этот инструмент позволил выделить землетрясения, расчет которых дал основной вклад в аномальные значения LURR и рассмотреть возможную связь с основными ВОЗ.

На рис. 3 показаны распределения для прогноза трех землетрясений, в том числе 16 событий (желтый цвет), определивших аномалию LURR перед Онорским землетрясением. Они располагаются между 51 и 53° с.ш. и 142 и 144° в.д. Основная группа событий (14 из 16) находится в области: 50.8—52.2° с.ш.; 142—143.7° в.д. С 2012 по 2015 г. именно здесь происходили самые сильные события в северной части Сахалина ($4 < M_w < 5$). Результат дополнительных расчетов по уточнению зоны подготовки ожидаемого землетрясения очевиден — она находится ближе к центральной части острова, нежели на севере. В целом рис. 3 показывает, что связь землетрясений — индикаторов неустойчивости с областью будущего очага слабая, их позиции в пространстве нельзя назвать зоной подготовки. Лишь в случае с Нефтегор-

ским землетрясением события оконтурили зону подготовки. Домены, в которых они произошли, при-мыкают к линеamentу L17.1 — очагу Нефтегорского землетрясения. Пока результат сопоставления с тектонической моделью нельзя считать полезным для пространственной локации зоны прогноза сейсмической опасности.

Отсутствие в каталоге [Stepnov et al., 2014] представительных сейсмических данных между 48 и 50° с.ш. вносит коррективу — мы не можем утверждать, что зона прогноза могла бы располагаться ниже 51°. Менее вероятно, что эта зона выше 52° с.ш. Результаты дополнительного исследования были оформлены в виде статьи в сборник материалов VI Сахалинской молодежной научной школы «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз», организованной Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) с 3 по 8 октября 2016 года в г. Южно-Сахалинск. Материал был направлен в конце июня 2016 г. 14 августа 2016 г. в 11 ч 15 мин гринвичского времени в 58 км юго-западнее п. Тымовское Сахалинской области было зарегистрировано землетрясение с магнитудой $M_w = 5.8$. Наибольшие проявления от землетрясения испытали жители населенных пунктов центральной части о. Сахалин, а также Хабаровского края. В соответствии с расчетом механизма подвижка в очаге землетрясения 14 августа 2016 г. произошла под действием северо-восток—юго-западных напряжений сжатия, тип сейсмодислокации — взброс со сдвиговой компонентой. Одна из возможных плоскостей разрыва ориентирована на север и падает на восток, другая имеет юго-восточное простирание и более круто падает на юго-запад. В эпицентральной зоне Онорского землетрясения 14 августа 2016 г. Западно-Сахалинское поднятие ближе всего расположено к Восточно-Сахалинскому поднятию и отделяется от него узкой частью Тымь-Поронайского синклинория. К этой зоне приурочены и эпицентры максимально наблюдаемых землетрясений Онорских 1909 г. ($M = 6.1$), 1912 г. ($M = 5.5$), 1959 г. ($M = 5.5$). По данным [Оскорбин и др., 1997], здесь проходит область контрастного сочленения с Тымь-Поронайским синклинорием и Центрально-Сахалинский взбросонадвиг, об активности которой свидетельствует возникновение землетрясений.

ВЫВОДЫ

Параметры прогноза практически полностью соответствуют наблюдаемым значениям, удалось определить время и магнитуду, но эпицентр оказался смещен на юго-запад от выделенной зоны на расстояние около 50 км. Такая же погрешность присутствовала в параметрах прогноза Пильтунского землетрясения, точными оказывались оценки более крупных событий. Однако и Невельское, и Нефтегорское землетрясения были в зоне ответственности крупных разломов. Вероятно, что для событий в доменах точность определения положения эпицентра по методу LURR не может быть лучше. Объяснить это расхождение пока не представляется возможным, здесь может помочь только увеличение базы данных по прогнозам. В целом отклонение в пределах доменной зоны даже в 1°, с учетом [Уломов, 1993] не является критичным. Также при небольшой магнитуде Онорского землетрясения зафиксировано время ожидания, сопоставимое с самым сильным Нефтегорским землетрясением (18 мес.), что ставит под сомнение первоначальный вывод о связи времени ожидания с магнитудой готовящегося события (по данным таблицы). В настоящее время в ИМГиГ ДВО РАН продолжается мониторинг сейсмической опасности методом LURR в режиме, близком к реальному времени, по данному типу прогнозов (обновление каждый месяц). Метод среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR может применяться для территории о. Сахалин.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы Минобрнауки России «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEF160714X0105).

ЛИТЕРАТУРА

- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М., Наука, 2006, 254 с.
- Закупин А.С. Seis-ASZ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016611230, 28 января 2016а.
- Закупин А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса // Геоинформатика, 2016б, № 1, с. 34—43.
- Закупин А.С., Жердева О.А. Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для Северного Сахалина // Вестник ДВО РАН, 2017, № 1, с. 18—25.
- Закупин А.С., Тихонов И.Н., Тараканов Р.З. Приливные деформационные возмущения как инструмент для прогноза сейсмической опасности (на примере Южного Сахалина) // МОНИТОРИНГ. Наука и технологии. 2016, № 1(26), с. 25—30.
- Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций) / Ч.У. Ким, Е.П. Семенова, О.А. Жердева, Сен Рак Се, В.И. Михайлов, Ю.Н.

Левин, И.С. Паршина, Н.А. Урбан, М. Касахара, М. Ичиянаги, Х. Такахаши. Владивосток, Дальнаука, 2011, 357 с.

Кособоков В.Г., Кейлис-Борок В.И., Смит С.У. Локализация среднесрочного прогноза землетрясений // Докл. АН СССР, 1990, т. 312, № 2, с. 326—331.

Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеанская геология, 2012, т. 31, № 5, с. 93—103.

Оскорбин Л.С., Бобков А.О. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 1997, с. 154—178.

Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С., Нагорных Т.В., Пермикин Ю.Ю., Поплавский А.А., Фокина Т.А., Ким Чун Ун, Краева Н.В., Рудик М.И., Сафонов Д.А., Дорошкевич Е.Н., Паршина И.А., Жердева О.А. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905—2005 гг. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 2006, 103 с.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 314 с.

Тихонов И.Н., Закупин А.С. Ретроспективная оценка применимости двухэтапной схемы краткосрочного прогнозирования землетрясений ($M \geq 5$) Южного Сахалина по данным детального каталога // Вестник ДВО РАН, № 1(185), 2016, с. 58—67.

Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В., Медведева Н.С., Саваренская О.Е., Степанова М.Б. Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М., ОИФЗ РАН, 1993, с. 99—108.

Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды ИФЗ АН СССР, 1965, № 36, с. 66—93.

Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М., Наука, 1968, с. 121—150.

Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М., Наука, 2005, 303 с.

Elizarov S., Li Qi. Load/unload response ratio (LURR), accelerating moment/energy release (AM/ER) and state vector saltation as precursors to failure of rock specimens // Pure Appl. Geophys., 2004, v. 161, p. 2405—2416. doi:10.1007/s00024-004-2572-8.

Feng Y., Ji G., Cui W. Parallel computing for LURR of earthquake prediction // Int. J. Geophys, 2012, v. 2012, Art. ID 567293.

Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M. Diagnosis of time increased probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. v. 61, № 1—2, p. 57—72.

Ottmøller L., Voss P., Havskov J. SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx. 2011, <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software>.

Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Konovalov A.V., Ottmoller L. New architecture of an automated system for acquisition, storage, and processing of seismic data // Seismic Instruments, 2014, v. 50, № 1, p. 67—74.

Yin X.C., Xuezhong C., Ziping S., and Can Y. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory // Pure Appl. Geophys., 1995, v. 145, № 3/4, p. 701—715.

Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. Development of a new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory // Pure Appl. Geophys., 2001, v. 157, № 11/12, p. 2365—2383.

*Рекомендована к печати 25 апреля 2018 г.
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию 4 мая 2017 г.,
после доработки — 8 ноября 2017 г.*